第47卷 第4期
2024年4月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 4
Apr. 2024

多源遥感降水产品在西北干旱区的气象干旱性能评估

黄曼捷[1,2]， 李艳忠[1,2]， 王渊刚[3]， 于志国[1,2]， 庄稼成[1,2]， 星寅聪[1,2]

（1. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院，江苏 南京 210044；2. 水利部水文气象灾害机理与预警重点实验室，江苏 南京 210044；3. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：多源遥感降水产品在气象站点稀少或分布不均地区的干旱监测方面，发挥着至关重要的作用，比如地处中国西北的干旱区。选择5套典型遥感降水产品（PERSIANN、CHIRPS、CMORPH、TMPA和MSWEP），基于标准化降水蒸散指数（SPEI），评估了降水产品在3种时间尺度的气象干旱性能；通过游程理论识别干旱事件，阐释了遥感降水产品捕获干旱事件的能力。研究表明：(1) 在西北干旱区，5套遥感降水产品均能较好地捕捉多年平均降水量的空间分布格局，但却难以准确地捕捉降水的变化趋势。(2) 在捕获SPEI性能方面，MSWEP最优，其次为TMPA、PERSIANN和CHIRPS，CMORPH表现最差。1个月尺度（SPEI1）是遥感降水产品识别气象干旱的最佳时间尺度。(3) 在刻画干旱事件的特性方面，CHIRPS对干旱事件数量的识别能力最佳，PERSIANN最差；MSWEP和TMPA表征干旱严重性最好，CHIRPS较差；除CMORPH外，其余4套产品均能较好地捕获干旱事件的强度和极值。综上所述，虽然5套遥感降水产品整体上可较好地捕获西北干旱区的干旱特征，但由于受降水产品反演算法、地形复杂性以及地面验证站点疏密程度的影响，较难以找到一种降水产品在捕获干旱特性所有方面均表现最优。研究成果可为区域气象干旱监测最佳降水产品的选择，以及遥感降水产品在极端干旱环境反演算法的改进方面提供参考。

关 键 词：遥感降水；SPEI；干旱特征；游程理论；西北干旱区

文章编号：1000－6060(2024)04－0549－12(0549～0560)

干旱是一种由于缺乏持续降水而引发的气候现象[1]。相比于洪水和台风等极端气象灾害，干旱的发展过程更为缓慢，通常需要几个月，易被人忽视，一旦成灾，其持续时间较长，波及范围较广[2]，可能给自然生态系统和人类社会经济带来重大损害，尤其是在生态系统脆弱的干旱和半干旱地区[3]。因此，监测干旱的演变规律并量化其特征，对于干旱的预警、水资源管理以及经济社会可持续发展至关重要。

为了量化干旱事件的特征，人们发展了诸多干旱分析和监测技术，其中最普遍的方法之一是设计适用的干旱指数[4]。比如，评价气象干旱常用的指标有帕尔默干旱严重指数（PDSI）、标准化降水指数（SPI）和标准化降水蒸散指数（SPEI）。PDSI基于水分供需平衡理论，考虑了降水、土壤、气温等因素对干旱演变的影响[5]，可表征长期干旱过程[6]，也能比较全面地揭示干旱发生的过程机理。但PDSI也存在对土壤信息敏感性高、时间尺度固定等缺点[7]。SPI计算相对简单，时间尺度更灵活，且仅需降水作为输入，克服了PDSI的部分缺点，应用广泛[8]。SPI的计算是基于2个假设：一是降水的可变性远高于其他变量，如气温和潜在蒸散发量（PET）；二是其他变量的时间变化趋势可忽略。然而，在气候变化条件下，随着气温和蒸发的增加，SPI的适用性有待商榷[9]。相对而言，SPEI则基于气候水量平衡概念，不仅考虑了蒸散发对干旱的敏感性，而且还保留了

收稿日期：2023-04-03； **修订日期：**2023-04-19
基金项目：国家自然科学基金（41701019）资助
作者简介：黄曼捷（2000-），女，硕士研究生，主要从事水文气象等方面的研究. E-mail: huangmj0606@163.com
通讯作者：李艳忠（1984-），男，博士，副教授，主要从事水文气象与3S技术应用等方面的研究. E-mail: liyz_egi@163.com

SPI优点，能更好地捕捉气温和蒸散发增加地区的干旱动态。目前，SPEI已经被广泛应用于不同时间尺度的干旱监测和预警[10-12]。

使用SPEI进行干旱监测时，降水数据的精确与否是限制干旱监测精度的关键[13]。虽然基于地面站点观测的降水可以获得降水的近似真值，但由于地形复杂、经济欠发达等因素导致气象站分布稀疏且不均匀，难以获得精确的降水空间分布格局。遥感降水产品具有数据一致且同质、准全球覆盖、近实时估计和高时空分辨率的特点[14-16]，为精确获取大尺度的降水分布格局提供了可能。随着卫星遥感技术的发展，全球遥感降水产品逐渐出现[17]，例如基于人工神经网络的遥感降水估算（PERSIANN）产品、气候灾害组融合站点的红外降水（CHIRPS）产品、评估多源集成降水（MSWEP）产品、实时卫星反演降水技术（CMORPH）产品、热带降雨测量任务卫星（TRMM）产品、全球降水任务的集成多卫星检索（IMERG）和全球降水卫星测绘（GSMaP）产品等，都是具有高精度、高分辨率的遥感降水产品。

为了阐明不同遥感降水产品对干旱事件的监测性能，国内外学者开展了一系列的性能评估研究[18-22]。例如，Guo等[23]利用CHIRPS对湄公河下游地区进行干旱监测评价，发现CHIRPS能够较好地捕捉不同时间尺度的干旱特征，其中3个月时间尺度的表现最好；Arshad等[24]以巴基斯坦地区雨量计数据为参考，对综合多卫星反演（GPM-IMERG）和热带降雨测量任务（TRMM-3B42）降水产品进行了评估，发现IMERG始终表现较好，TRMM-3B42次之，但存在一定的区域差异性；Liu等[25]在青藏高原地区，对CHIRPS和MSWEP的干旱监测能力进行评价，发现虽然MSWEP的精度高于CHIRPS，但CHIRPS空间分辨率更高，更适合于小规模地区研究。综上可知，在利用遥感降水产品评估干旱特征时，较多研究使用SPI作为干旱指标。但是，SPI难以客观反映气候变化背景下的干旱演变规律，比如中国西北干旱区因受到气候变化的影响，近些年已呈现出显著的暖湿化趋势。另外，面对诸多的遥感降水产品，其在干旱区的性能如何？使用可反映气候变化特性的SPEI指标，开展不同遥感降水产品在干旱区的气象干旱性能评估研究，有助于这一科学问题的解答。

中国西北干旱区处于亚欧大陆中部，受降雨偏少且分布极其不均匀的影响，属于典型的半干旱和干旱气候区[26]。受观测站点稀疏、地形复杂等因素的影响，仅靠地面观测降水难以捕获气象干旱的时空演变格局，但多源遥感降水产品为干旱的动态监测提供了可能[27]。目前，关于遥感降水产品在西北干旱区捕获干旱特征的综合研究相对薄弱。基于此，本文选择西北干旱区为研究区，以实测降水格网数据（CMA）为标准，基于SPEI和游程理论，评估了5种（PERSIANN、CHIRPS、CMORPH、TMPA和MSWEP）常用遥感降水产品对西北干旱区气象干旱的监测性能。本研究将为西北干旱区遥感降水产品数据源的选择，以及遥感降水反演算法的改进提供科学参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

西北干旱区地理位置介于33°~46°N、69°~108°E之间，位于亚欧大陆中部。由于降雨少而不均，温度高，蒸发大，该区属于典型的半干旱和干旱气候区。区域多年平均降水量约为122 mm，多年均温为6~9 ℃。区内地形地貌条件复杂，既有海拔7900 m的昆仑山脉，又有海拔-190 m的内陆盆地。尽管区域极度干旱，但是不稳定的降水仍然诱发了众多的干旱事件，给当地农业生产和生态系统带来威胁。

1.2 数据来源

本文所用的气象数据来源于国家气象信息中心（http://data.cma.cn/），包含了全国2412个站点，该数据为1960—2019年逐日降水、气温、风速、相对湿度、日照时长等常规气象数据变量。本研究区涵盖了81个气象站点，选择的时间区间为1998—2019年。为获取空间格网数据，本研究利用Anusplin软件，将逐日降水数据其插值到0.05°×0.05°的网格上，选择的时间跨度为1998—2019年。其中，Anusplin基于薄盘样条函数理论，引入多个影响因子（经纬度、高程等）作为协变量，进行气象要素空间插值，相比于其他插值结果精度更高[28]。此方法插值结果分别与反向距离权重法和普通克吕格法的插值结果进行对比，Anusplin软件的插值误差最小[29]。

本文选取了5套遥感降水产品，包括PERSIANN、CHIRPS、CMORPH、TMPA和MSWEP。其中，PERSIANN-CDR产品是利用卫星GridSat-B1红外数据，由PERSIANN算法生成的。它提供了一致、长

期、高分辨率的全球降水数据集，用于研究由于气候变化引起的降水变化，特别是极端事件[30]。CHIRPS结合了高分辨率卫星图像和观测数据，为气候变化趋势分析和干旱监测研究提供了一个相当低延迟、高分辨率、低偏差和长周期降水数据集[31]。CMORPH是由美国气候预测中心（CPC）在多种微波降水数据和红外数据的基础上研制的全球高时空分辨率降水数据，适用于研究从中尺度到年际范围内的降水及其时空变化[32]。TMPA是由美国国家宇航局（NASA）发布的多卫星降水分析数据产品[33]，它是应用最广泛、综合性能最好的遥感降水产品[34-36]，在澜沧江流域干旱监测中得到了很好的验证[37]。MSWEP利用测量数据、卫星数据和基于再分析的数据的互补优势，提供可靠的全球降水估计值[25]。为了评估的一致性，数据集的空间分辨率均为0.05º×0.05º，选取的研究时间跨度为1998—2019年。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水蒸散指数（SPEI） SPEI是一种评价气象干旱的常见指标，它是通过计算潜在蒸散量与降水量的差值经标准化处理后得到的，具有更明确的物理意义和多时间尺度等优点，可更好地捕捉干旱动态。本文选取了3种典型时间尺度，SPEI1、SPEI3和SPEI6，评价了多源遥感产品对干旱演变的监测性能。本研究计算SPEI采用经过联合国粮农组织（FAO）于1998年修正后的Penman-Monteith公式计算，公式如下[12]：

$$PET=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T_a+273}u_2\mathrm{VPD}(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \quad (1)$$

式中：PET为日潜在蒸散发（$mm\cdot d^{-1}$）；Δ为气温-饱和水汽压曲线斜率（$kPa\cdot ℃^{-1}$）；R_n为地表净辐射（$MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$），$G$为土壤热通量变化（$MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$，日尺度可忽略）；$\gamma$为干湿球常数（$kPa\cdot ℃^{-1}$）；$T_a$为2 m高度平均日气温（℃）；$u_2$为2 m高度风速（$m\cdot s^{-1}$）；VPD为水汽压差（kPa）；$e_s$为饱和水汽压（kPa）；$e_a$为实际水汽压（kPa）。根据SPEI值，干旱等级可从轻旱到特旱划分为5类（表1）[38]。

1.3.2 统计评价指标 为定量研究5套遥感降水产品在西北干旱区的气象干旱性能，本文选取了Kling-Gupta系数（KGE）、相对偏差（BIAS）2种统计评价指标，各计算公式如下[7]：

$$CC=\frac{\sum_{i=1}^{n}(G_i-\bar{G})(S_i-\bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(G_i-\bar{G})^2\sum_{i=1}^{n}(S_i-\bar{S})^2}} \quad (2)$$

$$KGE=1-\sqrt{(1-CC)^2+(1-\alpha)^2+(1-\beta)^2},\quad \alpha=\frac{\sigma_S}{\sigma_O},\ \beta=\frac{\mu_S}{\mu_O} \quad (3)$$

$$BIAS=\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i-G_i)}{\sum_{i=1}^{n}G_i}\times 100\% \quad (4)$$

式中：CC为相关系数；n为样本容量；G_i、$\bar{G}$分别为观测降水的降水值和均值；S_i、$\bar{S}$分别为遥感产品的估算降水值和均值；KGE为Kling-Gupta系数；α为观测降水均值与遥感降水估计均值之比；β为观测降水标准差与遥感降水估计标准差之比；σ_O、μ_O分别为观测降水的均值和标准差；σ_S、μ_S分别为遥感降水估计值的均值和标准差；BIAS为相对偏差。

表1　干旱指数等级划分

Tab. 1　Classification criteria of drought index

SPEI值	干旱类型
SPEI>-0.5	无旱
-1.0<SPEI≤-0.5	轻旱
-1.5<SPEI≤-1.0	中旱
-2.0<SPEI≤-1.5	重旱
SPEI≤-2.0	特旱

注：SPEI为标准化降水蒸散指数。

1.3.3 游程理论和干旱事件特征 本文使用游程理论来识别干旱事件[39]，当SPEI小于-0.5且历时2个月以上时，便被认定为一次干旱事件。平均干旱严重程度（MDS）、平均干旱强度（MDI）和平均干旱峰值（MDP）分别表征了干旱事件的严重程度（DS）、强度（DI）和峰值（DP），计算公式如下[7]:

$$MDS=\frac{\sum_{i=1}^{n}DS_i}{N},\quad DS=\sum_{j=1}^{DD}SPEI_j \quad (5)$$

$$MDI=\frac{\sum_{i=1}^{n}DI_i}{N},\quad DI=\frac{DS}{DD} \quad (6)$$

$$MDP=\frac{\sum_{i=1}^{n}DP_i}{N},\quad DP=\max SPEI_j,\quad 1\leqslant j\leqslant DD \quad (7)$$

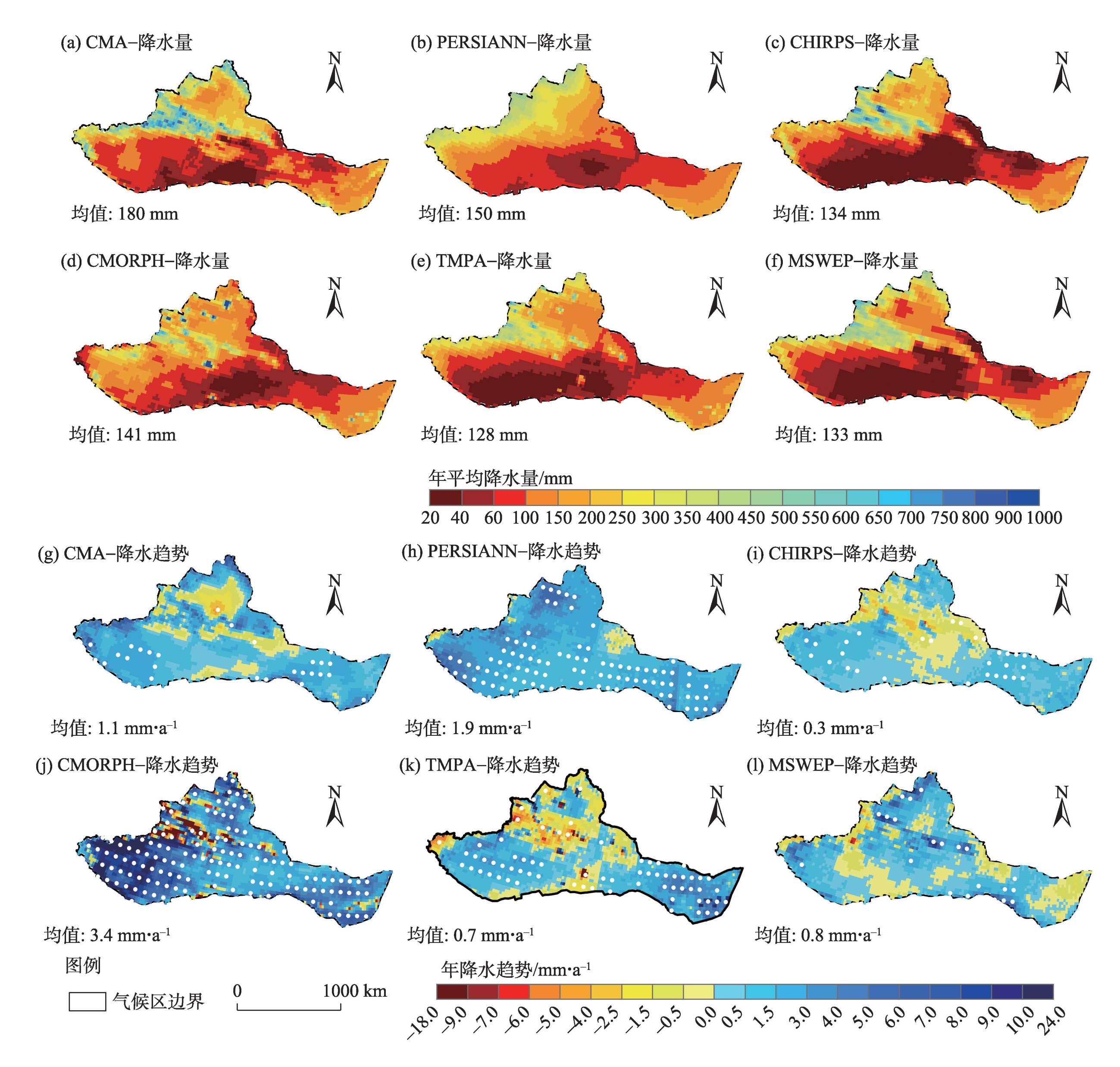
式中：MDS、MDI、MDP分别为平均干旱严重程度、平

均干旱强度、平均干旱峰值；DS、DI、DP、DD分别为一次干旱事件的严重程度、强度、峰值、历时；N为干旱事件数；SPEI为标准化降水蒸散指数；i为第i个干旱事件；j为特定干旱事件中的第j个干旱月份。

2 结果与分析

2.1 遥感降水产品反演降水的时空格局特征

图1分别展示了CMA和5种遥感降水产品的多年平均降水量和趋势的空间分布。由图可知，5种遥感降水产品基本捕捉到年均CMA的空间格局，却均低估了年平均降水量（图1）。其中，PERSIANN（150 mm）与CMA数据（180 mm）的多年平均值更接近，但存在区域差异性。相比其他4种产品，PERSIANN产品展示了更平滑的空间分布格局，但其较难以精准捕捉到局部地形降水的格局，例如明显低估了天山地区的高降水量信息（图1b）；CHIRPS、TMPA和MSWEP产品在西南部区域存在着明显的大范围降雨低估现象（图1c、e~f）。表明在不同的局部区域，这4套产品在估算降水量和捕捉其空间分



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作，底图边界无修改。CMA为实测降水格网数据；PERSIANN、CHIRPS、CMORPH、TMPA、MSWEP分别为5种遥感降水产品。图(g)~(l)中白色圆点表示上升趋势显著（P<0.05）。下同。

图1 1998—2019年CMA和5种遥感降水产品的年平均降水量与年降水趋势空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of precipitation mean and trends of CMA and five remote sensing precipitation products from 1998 to 2019

布格局方面性能较差,可能是由于复杂的地形和地面站点的稀疏分布所导致的。CMORPH产品捕捉的降水空间分布格局与CMA较为相似,较其他4种产品性能表现较好,但在高峻山脉地形处仍有差异(图1d)。总体而言,5种遥感降水产品能够基本捕捉年平均降水量的空间分布格局。

从年降水量变化趋势和显著性水平的空间格局来看,西北干旱区79.7%的区域呈增加趋势,其中21.1%的地区达到了显著性水平($P<0.05$),显著增加的区域主要集中在塔里木盆地和祁连山脉北部(图1g)。5种遥感降水产品难以准确地捕捉西北干旱区降水变化的时间演变趋势。例如,与CMA降水变化趋势均值(1.1 mm·a^{-1})相比,在准噶尔盆地、吐鲁番盆地和阿尔金山北部地区,PERSIANN的趋势值较高(图1h),PERSIANN的这些差异导致整个研究区域的年降水量变化趋势被高估了72.7%。而CMORPH对降水趋势的估计高估了209%,塔里木盆地的情况尤为明显(图1j)。对于CHIRPS和TMPA,研究区中部盆地区域的年降水量趋势被明显低估(图1i、k),而对于MSWEP,塔里木盆地和贺兰山西部地区的年降水量趋势被明显低估(图1l)。CHIRPS、TMPA和MSWEP降水趋势的这些差异导致降水趋势被低估了72.7%、36.4%和27.3%。综上所述,在西北干旱区,5套遥感降水产品均能较好地捕捉多年平均降水量的年际演变趋势,但却难以准确地捕捉降水量的趋势。

2.2 遥感降水产品对不同时间尺度SPEI的捕获能力

图2展示了1998—2019年西北干旱区对于不同时间尺度SPEI的变化趋势空间分布,其中SPEI的趋势数值小于0为下降趋势,表示趋于干旱,反之则趋于湿润。总体来看,随着时间尺度的增加,SPEI的变化趋势愈明显。例如,在塔里木盆地东部地区,CMA和5种遥感降水产品的SPEI1均呈下降趋势,而相比于SPEI1,SPEI6的下降趋势更加突出,即愈趋于干旱;在研究区东部的贺兰山西侧,CMA和5种遥感降水产品的SPEI1均呈上升趋势,而相比于SPEI1,SPEI6的上升趋势更加突出,即愈趋于湿润。不同遥感降水产品对SPEI空间格局的捕获能力而言,5种遥感降水产品基本都能捕捉到CMA不同尺度的SPEI空间分布格局,但也有所差异。

图3展示了5种遥感降水产品在不同时间尺度Kling-Gupta系数(KGE)的空间分布。由图可知,在西北干旱区的大部分区域,不同时间尺度上各个遥感降水产品的KGE在不同区域的产品性能仍存在差异。5种遥感降水产品在天山地区SPEI值的估算性能较差(KGE<-4),这可能是由于复杂的地形和地面站点的稀疏分布所导致的。

对整个研究区域而言,MSWEP对SPEI值的估算接近于真值($\overline{\text{KGE}}=-0.41$),一致性最优,而CMORPH一致性较差($\overline{\text{KGE}}=-1.32$)。在不同遥感产品评估SPEI的性能方面,总体来看,MSWEP明显优于其他4套产品,其次为TMPA、PERSIANN和CHIRPS,CMORPH表现最差。

各遥感降水产品在不同时间尺度呈现出较为一致的SPEI值估算性能,在西北干旱区呈现出时间尺度为1个月(SPEI1)时一致性最好,其次为3个月(SPEI3),最差为6个月(SPEI6)。因此,SPEI1是各遥感降水产品识别气象干旱的最佳时间尺度。

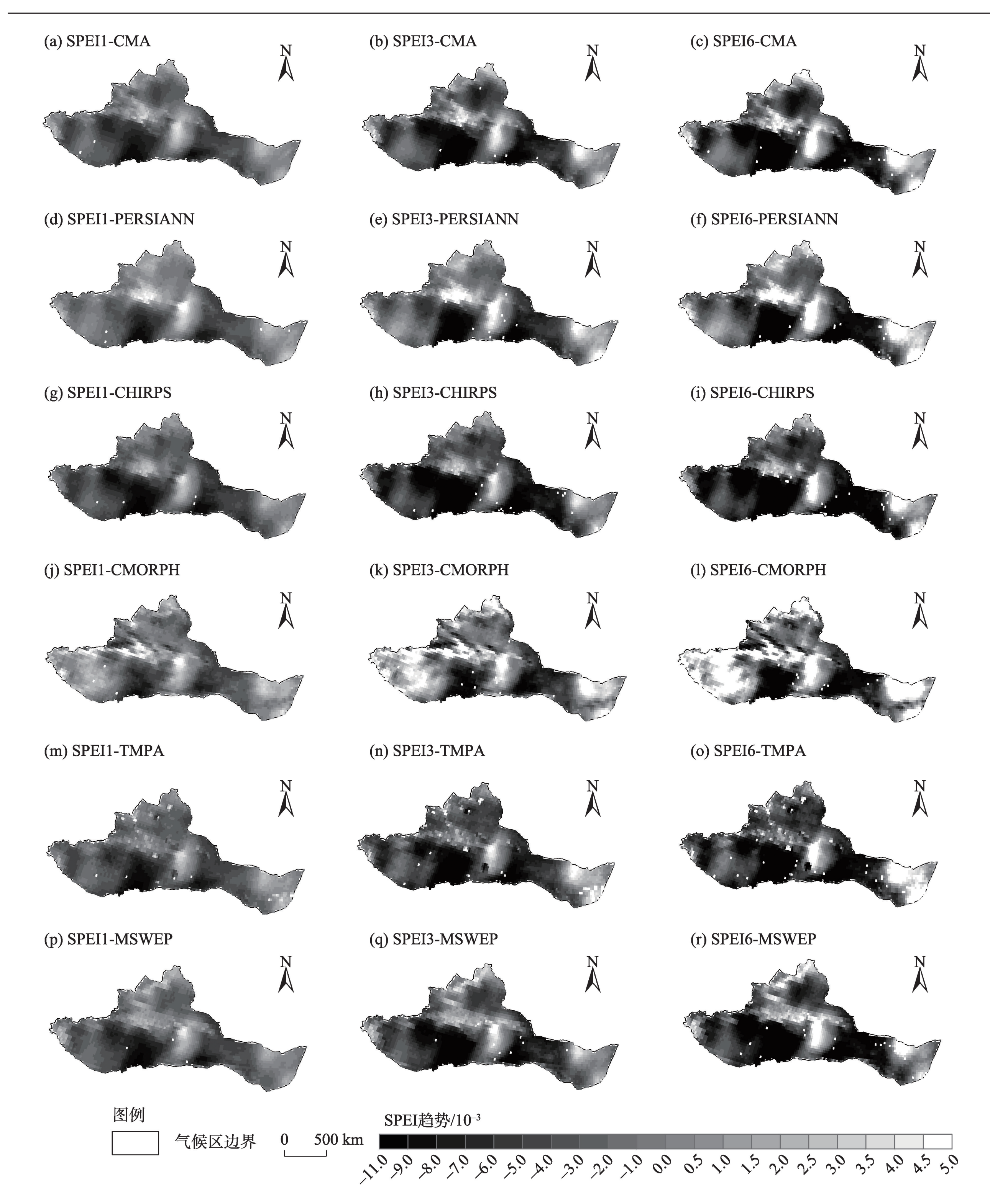
2.3 气象干旱事件特征分析

基于3.2部分的结论,即在西北干旱区一个月尺度的SPEI是各遥感降水产品识别气象干旱的最佳时间尺度,因此利用SPEI1识别干旱事件,并借助4个指标(N、MDS、MDI和MDP)刻画干旱事件的特征,综合评价遥感降水产品监测干旱事件的性能。图4和图5分别展示了1998—2019年这4个干旱事件指标的空间分布和统计信息。

在西北干旱区,干旱事件数量为23.70个,干旱事件数量较少的分布在祁连山脉以西、阿尔金山以北地区、天山地区和北部的阿尔泰山地区,干旱事件较多的分布在塔里木盆地和河西走廊地区大部(图4a)。各个遥感降水产品普遍高估了干旱事件数量,PERSIANN高估了2.95%,CHIRPS与CMA最为接近(高估了0.42%,图5)。

对干旱事件的严重性而言,CHIRPS高估了MDS约7.19%,PERSIANN则低估了MDS(4.69%),而其他3种遥感产品在空间分布格局和偏差较为相似(图5)。然而,从空间格局上看,CMORPH产品表明在塔里木盆地北部地区被明显低估(图4n)。

对于干旱事件的MDI方面,CMA的MDI为1.90(图4c),5种遥感产品在空间分布格局和统计结果上大体一致,且与CMA相比,偏差较小,为1%左右浮动(图5)。MDP可以反映干旱事件的极端程



注：SPEI1、SPEI3、SPEI6分别为时间尺度为1个月、3个月、6个月的SPEI。下同。

图2 1998—2019年CMA和5种遥感降水产品在不同时间尺度的SPEI变化趋势空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of SPEI trends of CMA and five remote sensing precipitation products at different time scales from 1998 to 2019

度。基于CMA计算的MDP为2.21(图4d)，CMORPH高估了大部分地区的干旱极值(MDP=2.25)，偏差为1.81%。从空间格局上看，天山地区被明显高估，而其他4种遥感产品与CMA相比较，在空间分布格局和偏差较为相似且较小(图5)。

综上可知，在SPEI1估算的4个干旱特征中，

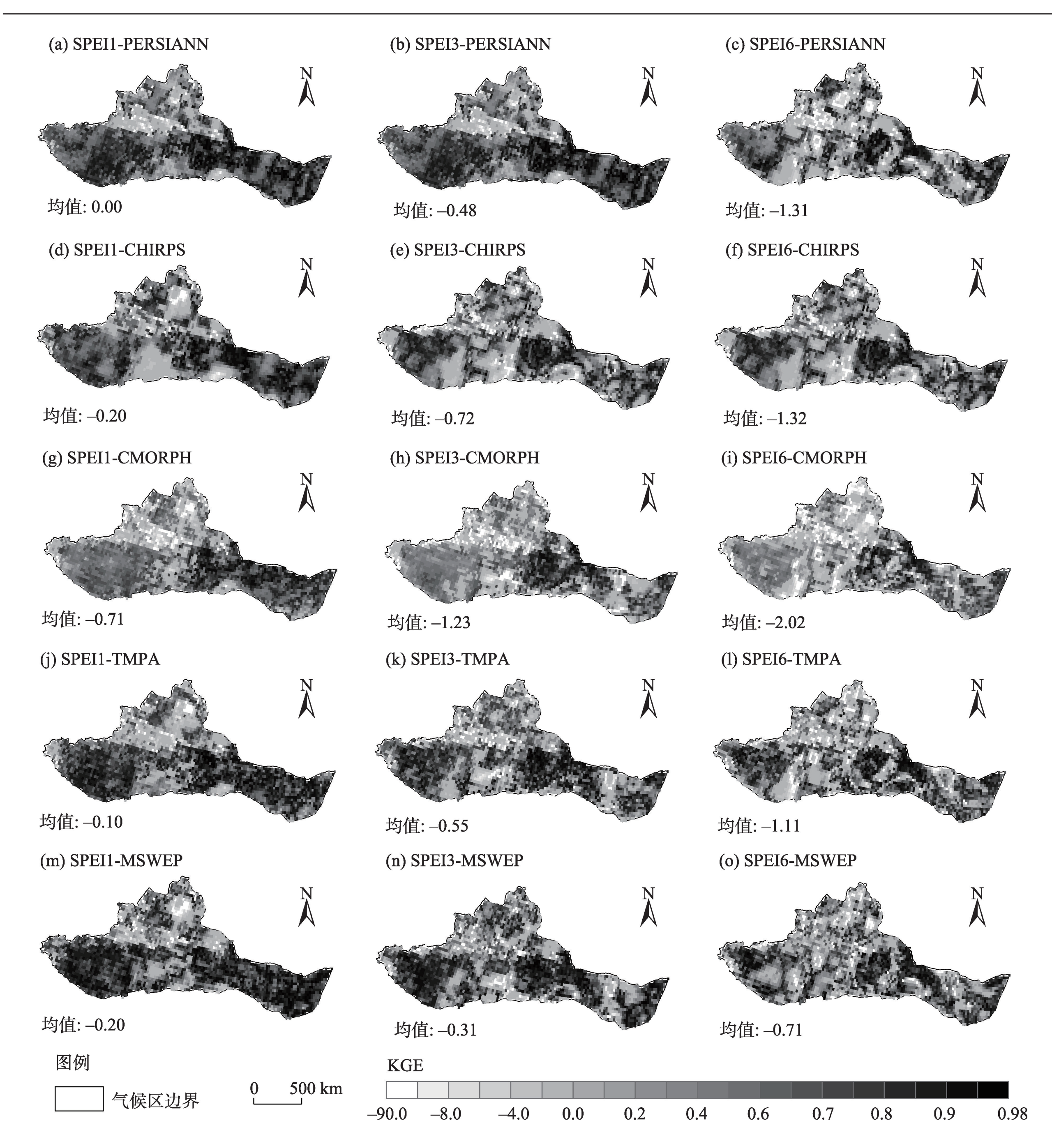


图3　5种遥感降水产品在不同时间尺度Kling-Gupta系数(KGE)的空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of Kling-Gupta coefficients (KGE) of five remote sensing precipitation products at different time scales

CHIRPS对 N 的识别能力最佳，PERSIANN最差；MSWEP和TMPA表征MDS最好，CHIRPS较差；除CMORPH外，其余4套产品均能较好地捕获干旱事件的强度和极值。

3　讨论

本研究发现，在西北干旱区，5套遥感降水产品均能较好地捕捉多年平均降水量的空间分布格局，但却难以准确地捕捉降水量的趋势，这与Li等[7]的研究发现在干旱地区，遥感降水产品捕捉多年平均降水量趋势的表现较差的结论相一致。在不同遥感产品评估SPEI的性能方面，本研究得出在西北干旱区MSWEP明显优于其他4套产品，这与Guo等[3]的结论一致。在干旱事件特征方面，Guo等[3]分析得出PERSIANN常高估MDP，而CHIRPS常低估MDP，这与本文结果有出入，可能是由选取计算干旱指标不同造成，也就是本文选取的是SPEI，比SPI



注：*N*为干旱事件的数量；MDS为干旱事件严重性；MDI为平均干旱强度；MDP为平均干旱极值。下同。

图4　基于SPEI1的1998—2019年干旱事件特征的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of drought event characteristics from 1998 to 2019 based on SPEI1

多考虑了潜在蒸散发的影响。另外的一种可能性，就是选择分析SPEI时间尺度不同。

虽然本研究对数据源和研究方法都进行了严格的质量控制，但是依然存在一些不确定性。首先，在西北干旱区，受地形复杂和地面验证站点稀疏的影响，采用插值后的降水数据集评估降水产品的干旱性能，可能存在不确定性，因此在后续的研究中，可以考虑利用更多站点进行对比分析。但是，本文使用的Anuspline插值方法充分考虑了地形因素的影响，并且本文聚焦于遥感降水捕获干旱特征的大尺度格局，所以这对本文结论的影响有限。其次，本文只分析了3种时间尺度的干旱指标（SPEI1、SPEI3和SPEI6），对于其他尺度的结论是否一致，有待进一步研究。但是，诸多研究发现，对于气象干

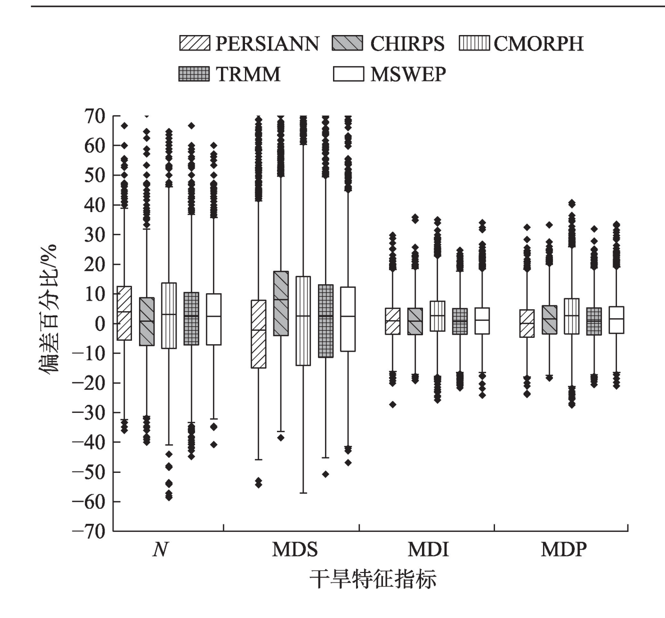


图5　基于SPEI1的不同遥感产品统计性能偏差百分比(与CMA相比较)

Fig. 5　Percentage of statistical performance deviation of different remote sensing products based on SPEI1 (compared with CMA)

旱事件而言,一般是在3个月尺度以内。本文研究也发现,SPEI1是衡量干旱特征的最佳时间尺度,与以往研究结论较为一致。另外,本文仅评价了遥感降水产品的气象干旱特征,但是水文干旱和农业干旱对人类社会的发展也至关重要。这些产品能否准确地捕获水文和农业干旱特征,笔者将在后续的研究中进一步探讨,从而进一步完善多源遥感降水在干旱区性能的评估。

4　结　论

本文选择了5套典型遥感降水产品(PERSIANN、CHIRPS、CMORPH、TMPA和MSWEP),基于SPEI,评估了这些降水产品在3种时间尺度的气象干旱性能;通过游程理论识别干旱事件,阐释了遥感降水产品捕获干旱事件的能力。主要结论如下:

(1) 在西北干旱区,5套遥感降水产品均能较好地捕捉多年平均降水量的空间分布格局,其中,PERSIANN(150 mm)与CMA数据(180 mm)的多年平均值更接近,但存在区域差异性,CHIRPS、TMPA和MSWEP产品在西南部区域存在着明显的大范围降雨低估现象,CMORPH产品捕捉的降水空间分布格局与CMA较为相似,较其他4种产品性能表现较好,但在高峻山脉地形处仍有差异;从年降水量变化趋势和显著性水平的空间格局来看,西北干旱区79.7%的区域呈增加趋势,其中21.1%的地区达到了显著性水平($P<0.05$),5种遥感降水产品却难以准确地捕捉西北干旱区降水变化的空间趋势,PERSIANN对降水趋势的估计高估了72.7%,而CMORPH高估了209%,CHIRPS、TMPA和MSWEP低估了72.7%、36.4%和27.3%。

(2) 随着时间尺度的增加,SPEI的变化趋势愈明显;对于不同遥感降水产品对SPEI空间格局的捕获能力而言,5种遥感降水产品基本都能捕捉到CMA不同尺度的SPEI空间分布格局,但也有所差异,其中MSWEP对SPEI值的估算接近于真值($\overline{KGE}=-0.41$),一致性最优,而CMORPH一致性较差($\overline{KGE}=-1.32$),总体来看,MSWEP最优,其次是TMPA和PERSIANN,较差的是CHIRPS和CMORPH。在西北干旱区呈现出时间尺度为1个月(SPEI1)一致性最好,其次为3个月(SPEI3),最差为6个月(SPEI6)。

(3) 西北干旱区干旱事件特征方面,干旱事件数量为23.70个,各个遥感降水产品普遍高估了干旱事件数量,PERSIANN高估了2.95%,CHIRPS与CMA最为接近;对干旱事件的严重性而言,CHIRPS高估了MDS约7.19%,PERSIANN则低估了MDS约4.69%,而其他3种遥感产品在空间分布格局和偏差较为相似;在干旱事件的平均强度方面,CMA的平均强度为1.90,5种遥感产品在空间分布格局和统计结果上大体一致,且与CMA相比,偏差较小,在1%左右浮动;对于平均干旱极值而言,CMORPH高估了大部分地区的MDP,偏差为1.81%,而其他4种遥感产品在空间分布格局和偏差较为相似且较小。

综上所述,5种遥感降水产品可以有效地捕获西北干旱区的干旱空间分布特征。然而由于受降水产品反演算法、地形复杂性以及地面验证站点疏密程度的影响,没有任何一种降水产品的表现在所有方面总是最优的,不同遥感降水产品应该谨慎应用于某些特定区域。因此,本研究成果可为区域干旱监测最佳降水产品的选择,以及遥感降水产品的改进方面提供参考。

参考文献(References)

[1]　Chiang F, Mazdiyasni O, AghaKouchak A. Evidence of anthropogenic impacts on global drought frequency, duration, and intensity

[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 2754, doi: 10.1038/s41467-021-22314-w.

[2] 许昕彤, 朱丽, 吕潇雨, 等. MSWEP降水产品在黄河流域气象干旱监测中的适用性评价[J]. 干旱区地理, 2023, 46(3): 371-384. [Xu Xintong, Zhu Li, Lü Xiaoyu, et al. Applicability evaluation of MSWEP precipitation product for meteorological drought monitoring in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46 (3): 371-384.]

[3] Guo H, Li M, Nzabarinda V, et al. Assessment of three long-term satellite-based precipitation estimates against ground observations for drought characterization in northwestern China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(4): 828, doi: 10.3390/rs14040828.

[4] 胡彩虹, 王金星, 王艺璇, 等. 水文干旱指标研究进展综述[J]. 人民长江, 2013, 44(7): 11-15. [Hu Caihong, Wang Jinxing, Wang Yixuan, et al. Review on research of hydrological drought index[J]. Yangtze River, 2013, 44(7): 11-15.]

[5] 杨银科, 盛强, 邵鹏鲲, 等. 基于树轮密度资料的黄河干流中部地区的PDSI序列重建[J]. 水电能源科学, 2022, 40(8): 1-4, 31. [Yang Yinke, Sheng Qiang, Shao Pengkun, et al. Reconstruction of PDSI sequence in central part of Yellow River based on tree rings density data[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(8): 1-4, 31.]

[6] Wang H, Zhang Y, Shao X. A tree-ring-based drought reconstruction from 1466 to 2013 CE for the Aksu area, western China[J]. Climatic Change, 2021, 165: 1-16.

[7] Li Y, Zhuang J, Bai P, et al. Evaluation of three long-term remotely sensed precipitation estimates for meteorological drought monitoring over China[J]. Remote Sensing, 2022, 15(1): 86, doi: 10.3390/rs15010086.

[8] Wu J, Liu Z, Yao H, et al. Impacts of reservoir operations on multiscale correlations between hydrological drought and meteorological drought[J]. Journal of Hydrology, 2018, 563: 726-736.

[9] Li L, She D, Zheng H, et al. Elucidating diverse drought characteristics from two meteorological drought indices (SPI and SPEI) in China[J]. Journal of Hydrometeorology, 2020, 21(7): 1513-1530.

[10] Tian F, Wu J, Liu L, et al. Exceptional drought across Southeastern Australia caused by extreme lack of precipitation and its impacts on NDVI and SIF in 2018[J]. Remote Sensing, 2019, 12(1): 54, doi: 10.3390/rs12010054.

[11] Haile G G, Tang Q, Leng G, et al. Long-term spatiotemporal variation of drought patterns over the Greater Horn of Africa[J]. Science of the Total Environment, 2020, 704: 135299, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135299.

[12] 薛华柱, 李阳阳, 董国涛. 基于SPEI指数分析河西走廊气象干旱时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2022, 43(11): 923-934. [Xue Huazhu, Li Yangyang, Dong Guotao. Analysis of spatial-temporal variation characteristics of meteorological drought in the Hexi Corridor based on SPEI index[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(11): 923-934.]

[13] Santos J F, Pulido-Calvo I, Portela M M. Spatial and temporal variability of droughts in Portugal[J]. Water Resources Research, 2010, 46(3): W03503, doi: 10.1029/2009WR008071.

[14] 成硕, 李艳忠, 星寅聪, 等. 遥感降水产品对黄河源区水文干旱特征的模拟性能分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1063-1072. [Cheng Shuo, Li Yanzhong, Xing Yincong, et al. Simulation performance of remote sensing precipitation products on hydrologic drought characteristics in the source region of the Yellow River[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1063-1072.]

[15] Agutu N O, Awange J L, Zerihun A, et al. Assessing multi-satellite remote sensing, reanalysis, and land surface models' products in characterizing agricultural drought in East Africa[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 194: 287-302.

[16] Thavorntam W, Tantemsapya N, Armstrong L. A combination of meteorological and satellite-based drought indices in a better drought assessment and forecasting in northeast Thailand[J]. Natural Hazards, 2015, 77: 1453-1474.

[17] 郭瑞芳, 刘元波. 多传感器联合反演高分辨率降水方法综述[J]. 地球科学进展, 2015, 30(8): 891-903. [Guo Ruifang, Liu Yuanbo. Multi-satellite retrieval of high resolution precipitation: An overview[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(8): 891-903.]

[18] Nguyen P, Ombadi M, Sorooshian S, et al. The PERSIANN family of global satellite precipitation data: A review and evaluation of products[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(11): 5801-5816.

[19] Gao F, Zhang Y, Ren X, et al. Evaluation of CHIRPS and its application for drought monitoring over the Haihe River Basin, China [J]. Natural Hazards, 2018, 92: 155-172.

[20] Alijanian M, Rakhshandehroo G R, Mishra A, et al. Evaluation of remotely sensed precipitation estimates using PERSIANN-CDR and MSWEP for spatio-temporal drought assessment over Iran[J]. Journal of hydrology, 2019, 579: 124189, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124189.

[21] Fallah A, Rakhshandehroo G R, Berg P, et al. Evaluation of precipitation datasets against local observations in southwestern Iran[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(9): 4102-4116.

[22] Bai L, Wen Y, Shi C, et al. Which precipitation product works best in the Qinghai-Tibet Plateau, multi-source blended data, global/regional reanalysis data, or satellite retrieved precipitation data?[J]. Remote Sensing, 2020, 12(4): 683, doi: 10.3390/rs12040683.

[23] Guo H, Bao A, Liu T, et al. Meteorological drought analysis in the lower Mekong Basin using satellite-based long-term CHIRPS product[J]. Sustainability, 2017, 9(6): 901, doi: 10.3390/su9060901.

[24] Arshad M, Ma X, Yin J, et al. Evaluation of GPM-IMERG and TRMM-3B42 precipitation products over Pakistan[J]. Atmospheric Research, 2021, 249: 105341, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105341.

[25] Liu J, Shangguan D, Liu S, et al. Evaluation and comparison of CHIRPS and MSWEP daily-precipitation products in the Qinghai-Tibet Plateau during the period of 1981—2015[J]. Atmospheric

Research, 2019, 230: 104634, doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104634.

[26] Ma J Z, Wang X S, Edmunds W M. The characteristics of groundwater resources and their changes under the impacts of human activity in the arid northwest China: A case study of the Shiyang River Basin[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 61(2): 277−295.

[27] Al-Kilani M R, Rahbeh M, Al-Bakri J, et al. Evaluation of remotely sensed precipitation estimates from the NASA POWER project for drought detection over Jordan[J]. Earth Systems and Environment, 2021, 5(3): 561−573.

[28] 刘志红, McVicar Tim R, Van Niel T G, 等. 专用气候数据空间插值软件ANUSPLIN及其应用[J]. 气象, 2008, 34(2): 92−100. [Liu Zhihong, McVicar Tim R, Van Niel T G, et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLINN[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(2): 92−100.]

[29] 钱永兰, 吕厚荃. 基于ANUSPLIN软件的逐日气象要素插值方法应用与评估[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(2): 7−15. [Qian Yonglan, Lü Houquan. Application and assessment of spatial interpolation method on daily meteorological elements based on ANUSPLIN software[J]. Journal of Meteorology and Environmental, 2010, 26(2): 7−15.]

[30] Ashouri H, Hsu K L, Sorooshian S, et al. PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(1): 69−83.

[31] Funk C, Peterson P, Landsfeld M, et al. The climate hazards infrared precipitation with stations: A new environmental record for monitoring extremes[J]. Scientific Data, 2015, 2(1): 1−21.

[32] Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution[J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(3): 487−503.

[33] Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(3): 38−55.

[34] Hu Q F, Yang D W, Wang Y T, et al. Accuracy and spatio-temporal variation of high resolution satellite rainfall estimate over the Ganjiang River Basin[J]. Science China: Technological Science, 2013, 56(4): 853−865.

[35] Sun R, Yuan H, Liu X, et al. Evaluation of the latest satellite-gauge precipitation products and their hydrologic applications over the Huaihe River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2016, 536: 302−319.

[36] Tong K, Su F, Yang D, et al. Evaluation of satellite precipitation retrievals and their potential utilities in hydrologic modeling over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519(A): 423−437.

[37] Zeng H, Li L, Li J. The evaluation of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) in drought monitoring in the Lancang River Basin[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22: 273−282.

[38] Gao L, Zhang Y. Spatio-temporal variation of hydrological drought under climate change during the period 1960—2013 in the Hexi Corridor, China[J]. Journal of Arid Land, 2016, 8: 157−171.

[39] Wu J, Yao H, Chen X, et al. A framework for assessing compound drought events from a drought propagation perspective[J]. Journal of Hydrology, 2022, 604: 127228, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127228.

Evaluation of meteorological drought performance of multisource remote-sensing precipitation products in arid northwest China

HUANG Manjie[1,2], LI Yanzhong[1,2], WANG Yuangang[3], YU Zhiguo[1,2],
ZHUANG Jiacheng[1,2], XING Yincong[1,2]

(1. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of Hydrometeorological Disaster Mechanism and Warning of Ministry of Water Resources, Nanjing 210044, Jiangsu, China; 3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Multisource remote-sensing precipitation products play an important role in drought monitoring in regions with few or uneven meteorological stations, such as arid areas in northwest China. In this study, five sets of typical remote-sensing precipitation products (PERSIANN, CHIRPS, CMORPH, TMPA, and MSWEP) were selected. The meteorological drought performance of the precipitation products at three timescales was evaluated based on the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI). The capability of remote-sensing precipitation products to capture drought events was explained by identifying drought events using the run-course theory. The results showed the following: (1) In arid northwest China, the five sets of remote-sensing precipitation products could capture the spatial distribution pattern of annual mean precipitation well, but it was difficult to accurately capture the change trend of precipitation. (2) MSWEP had the best performance in capturing SPEI, followed by TMPA, PERSIANN, and CHIRPS, and CMORPH had the worst performance. SPEI1 was the best timescale for remote-sensing precipitation products to identify meteorological droughts. (3) CHIRPS had the best recognition capability for several drought events, whereas PERSIANN had the worst. MSWEP and TMPA were the best indicators of drought severity, whereas CHIRPS was the worst. Except for CMORPH, the other four sets of products captured the intensity and extreme values of the drought events well. In summary, although the five sets of remote-sensing precipitation products could capture the drought characteristics of the northwest arid region on the whole, finding a precipitation product with the best performance in all aspects of capturing drought characteristics was difficult because of the impact of the inversion algorithm of falling aquatic products, terrain complexity, and density of ground verification stations. The results of this study can provide a reference for the selection of the best precipitation products for regional meteorological drought monitoring and for the improvement of remote-sensing precipitation products in the inversion algorithm of extreme drought environments.

Key words: remote sensing precipitation; SPEI; drought characteristics; run theory; arid northwest China